

황사의 대기환경영향

Impacts of Asian Dust on Atmospheric Environment

김 영 성*

한국외국어대학교 환경학과

(2011년 1월 14일 접수, 2011년 3월 2일 수정, 2011년 4월 25일 채택)

Young Sung Ghim*

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

(Received 14 January 2011, revised 2 March 2011, accepted 25 April 2011)

Abstract

ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) in spring 2001 was a turning point to trigger international research interest on Asian dust (AD). This basically arose from the lack of research on AD, the important natural phenomenon to characterize the Northeast Asia. In contrast, health risk related to AD has been the primary concern in Korea. Although due in part to severe AD events of 2001~2002, research and mitigation measures on AD in Korea are typically based on the assumption that AD events are increasing in frequency and severity. However, contrary to the trend in Korea, the number of AD days and emission amounts of AD in China have decreased since 1980s. This paper reviews the impacts of AD on ambient air quality and variations in toxic substances during the AD event, reflecting the concern in Korea. While a great amount of dust particles flow into Korea during the AD event, a considerable amount of dust particles are locally generated as well. Since dust particles are mixed with toxic substances as they pass over polluted areas, the levels of toxic substances become lower in dust particles that do not pass over polluted areas. Broadening the research scope on AD is warranted to understand the AD as an important natural phenomenon, irrespective of its associated health risk.

Key words : Size distribution, Trace elements, Inorganic ions, Persistent organic pollutants, Optical properties

1. 서 론

황사는 중국과 몽골의 사막, 황토고원, 만주 등에서 발생하여 강한 바람을 타고 장거리를 이동한 흙먼지이다. 기상청에서는 PM₁₀이 일정 농도 이상이거나 가시적으로 흙먼지를 관찰할 수 있을 때 황사를 판정하

므로(기상청 보도자료 2007. 2. 9) 황사는 물질명이기 보다 현상에 가깝다. 황사 발원지에 인위적 오염원이 거의 없기 때문에 황사는 대부분 광물질로 구성된 광물먼지(mineral dust)이다. 황사는 우리나라에서 사용하는 용어이며 국제적으로 통용되는 용어는 아시아 먼지(Asian dust)이다. 이때 먼지(dust)는 1 μ m 이상의 조대입자(coarse particles)를 지칭하는데 장거리를 이동한 먼지를 황사라고 할 뿐 기본적으로 도로비산 먼지 등과 유사하다. 그러나 먼지라고 하면 생활 주

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-330-4993, E-mail : ysghim@hufs.ac.kr

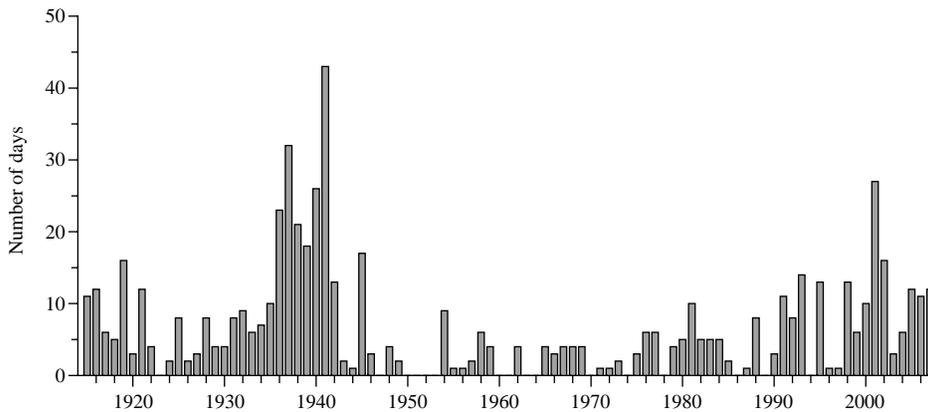


Fig. 1. Trends in the number of Asian dust days per year in Seoul, 1915~2007 (Source: National Institute of Meteorological Research).

변에서 발생하는 다양한 먼지나 석탄 먼지 등도 포함될 수 있으므로 광물먼지가 정확한 표현이 될 수 있다. 이와 같이 본다면 황사는 가시적으로 관찰이 가능한, 장거리 이동 광물먼지이다.

전세계적으로 광물먼지 발생이 가장 많은 지역은 사하라 사막이 위치한 북아프리카이다. 전세계 먼지의 50~70%가 이 지역에서 발생한다(Tanaka and Chiba, 2005; Ginoux *et al.*, 2004). 그러나 이 지역의 먼지는 주로 무역풍을 따라 대서양을 향한다. 반면 동아시아의 먼지 발생량은 약 20%이나 편서풍의 영향으로 중국 동부와 우리나라 등 인구밀집 지역을 향한다. Streets *et al.* (2009)은 세계 주요 인구밀집 지역을 미국, 유럽 등 8개 지역으로 나누어 1980년부터 2006년까지 AOD(aerosol optical depth)에 대한 에어로졸 종류별 기여도를 조사하였다. 다른 대부분의 지역과 같이 동아시아도 미세입자(fine particles)에 주로 존재하는 황의 기여도가 46%로 가장 높았으나 먼지의 기여도가 37%로 다음이었다. 동아시아를 제외하고는 인도대륙에서 먼지의 기여도가 35%로 높은 뿐 다른 지역에서는 8~20%로 낮았다.

Sun *et al.* (2001)은 1960년부터 1999년까지 40년간 봄철 중국 174개 관측소에서 2일 이상 지속된 60개의 중간 이상 먼지 폭풍의 이동 경로를 분석하였다. 주요 경로는 고비에서 발생한 황사가 각각 북한, 남한, 대만을 지나는 것으로 각각 7, 60, 33%이었다. 이들 결과에 의하면 남한은 세계 주요 인구밀집 지역 중 중국을 제외하고 광물먼지의 영향이 가장 큰 나

라일 수 있다.

1980년대만 하여도 황사는 대기환경연구에서 가장 중요한 주제의 하나였다(Lee *et al.*, 1988, 1986). 1990년대 이후 Chun *et al.* (2000), Park *et al.* (2001) 등의 연구가 있으나 다양한 환경문제들이 부각되며 황사에 대한 관심이 줄었다. 최근의 황사 연구는 주로 2001년과 2002년의 황사 때문이다(그림 1). 2001년은 1941년 이래 황사 관측일(황사일) 수가 가장 많았고 2002년에는 3월말과 4월초 초대형 황사가 차례로 유입되며 PM₁₀ 농도가 1시간 평균 3,311 μg/m³(4월 8일 새벽 3시 한남동), 일평균 1,510 μg/m³(4월 8일 구의동)을 기록하였다.

그림 1을 보면 1950년대와 60년대에 비하여 최근 황사일수가 완만하게 증가되는 모습이다. 그러나 1965~2004년을 대상으로 한 Kim (2008)의 사례수 분석에서는 1980년대 이후 증가 추세가 뚜렷하며, 2001~2008년 전국을 대상으로 한 전영신(2009, 개인 교신)의 황사이동경로 분석 자료에서도 유사한 경향을 볼 수 있다. 하나의 사례라도 황사일은 며칠일 수 있으므로 황사일수보다 사례수가 빠르게 증가하였다면 1, 2일의 단기 황사가 많아졌음을 의미한다. 이들 분석과 자료에서 드러난 또 하나의 사실은, 우리나라에 가까운 내몽골, 만주로부터 황사 유입이 늘었고 최근 이와 같은 경향이 더욱 뚜렷하다는 점이다. 경로의 변화가 황사의 단기화와 연관되었을 가능성이 있으므로 조사가 필요하다.

우리나라의 경향과 달리 중국의 양대 황사 발원지

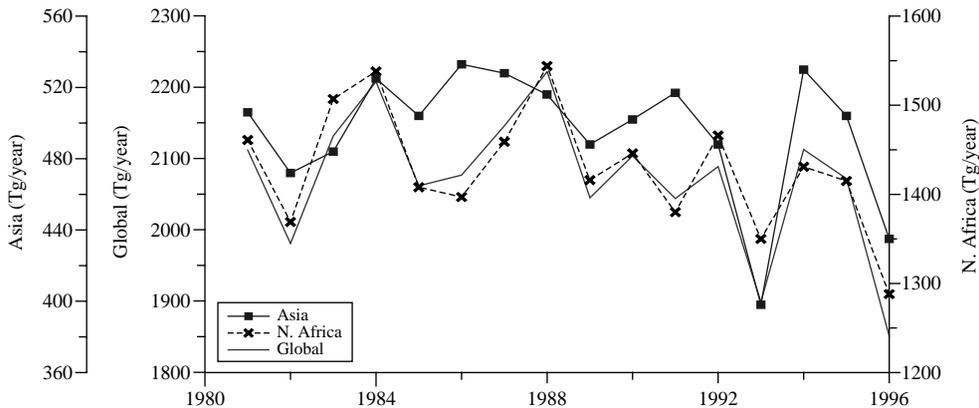


Fig. 2. Trends in dust emission from Asia in comparison with that from North Africa and the global amount (based on Table 2 in Ginoux *et al.*, 2004). The global amount is the sum of the emissions from North Africa, South Africa, North America, South America and Asia.

인 타클라마칸과 고비 사막의 먼지 발생은 1980년대 중반 이후 감소가 뚜렷하다(Wang *et al.*, 2008). Sun *et al.* (2001)은 1970년대 중국의 건조 혹은 반건조 지역에서 전반적으로 풍속이 높고 일부는 가뭄의 영향으로 모래 폭풍이 빈번하였던 것으로 해석하였다. 그러나 이와 같은 변화는 중국만의 현상이 아니다. Ginoux *et al.* (2004)의 자료를 살펴보면, 1981~1996년 기간 먼지 발생의 연평균 변화율이 아시아 -0.47%, 북아프리카 -0.45%로 거의 같다(그림 2). 먼지 발생의 변화 원인으로는 토지이용 변화와 기후변화가 거론되는데 연구에 따라 의견이 다르다(Mahowald *et al.*, 2004; Tegen *et al.*, 2004).

황사와 관련된 다양한 주제들이 있지만 대기환경 관점에서는 황사기간 오염물질 농도 변화와 황사 입자가 이와 같은 변화에 미치는 영향 등이 주요 주제가 될 수 있다(NIER, 2009). 황사가 우리의 대기 현상을 특징짓는 중요한 자연 현상의 하나임에도 황사에 대한 연구 동향을 한눈에 파악할 수 있는 총설 형태의 논문은 찾기가 쉽지 않다. 황사 자체는 일반인도 쉽게 인식할 수 있는 보편적 자연 현상이나 연구 대상으로서의 황사는 시기와 위치에 따라 특성이 달라 종합이 어렵기 때문일 수 있다. 국내외를 막론하고 황사를 대상으로 한 연구가 가장 많았던 때는 2001년 봄 ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment; Huebert *et al.*, 2003) 측정 때이다. 총설로서는 이들 내용을 정리한 Arimoto *et al.* (2006)

을 주목할 만하다.

이번 총설은 2항의 입자상 물질의 입경별 농도, 3~5항의 미량원소, 무기이온, 잔류성 유기오염물질 등 유해물질 농도, 6항의 광학 특성으로 구성하였다. 2항의 입경별 농도에서는 입경에 따라 장거리 이동과 국지 발생 먼지를 구분하고 황사가 유입됨에 따라 입경별 입자상 물질의 농도가 어떻게 변할 수 있는지를 알아보았다. 3~5항에서는 유해물질의 운반체 혹은 반응물로서의 황사의 역할을 다루었다. 중금속을 포함한 미량원소와 잔류성 유기오염물질의 경우 황사는 운반체이지만 무기이온 중 황산염, 질산염 등 2차 이온에 대해서는 운반체와 반응 참여 모두가 가능하다. 광학 특성은 최근 연구가 활발한 기후변화 영향과 1차적으로 연관되지만 장기간 무인 관측이 가능하기 때문에 다른 방식으로 쉽지 않은 발원지의 먼지 특성에 관한 정보를 줄 수 있다는 측면에서 살펴보고자 한다.

2. 입경별 농도

2.1 황사 입자의 입경별 농도

황사는 발원지에서 토양입자가 바람에 의하여 날리며 부서져서 형성된 전형적인 조대입자(coarse particle)이다. Clarke *et al.* (2004)은 ACE-Asia 기간 황사에 대하여 각각 MMD(mass median diameter)가 14.2,

5.1, 1.06 μm 인 3산 분포를 가졌다. 가장 작은 모드 입자의 입경은 0.1 μm 부근에 이르나 질량은 입경의 3승에 비례하므로 질량에서 차지하는 비율은 작다. 입경이 클수록, 보다 정확하게는 입경과 밀도의 함수인 공기역학적 직경이 클수록, 침강이 빠르므로 멀리 이동할 수 없다. 이에 따라 Husar(2003)는 북미에서 관찰된 먼지의 입경분포에서 2~4 μm 부근의 먼지는 사하라나 동아시아로부터 장거리를 이동한 것으로, 7~10 μm 혹은 그 이상의 먼지는 인근에서 발생한 것으로 보았다.

Mori *et al.* (2003)은 2001년 3월말 중국 북경과 일본 야마구치 시에서 11 μm 부터 0.43 μm 까지 8단의 다단 채취기를 이용하여 입경 분포를 조사하였다. 북경에서는 4.7~7.0 μm 사이에서 단일 최대점이 나타난 데 비하여 야마구치 시에서는 0.43~0.65 μm 와 3.3~4.7 μm 등 2개의 최대점이 나타났다. 북경과 발원지는 통상의 장거리 이동 거리보다 가까운 까닭에 Husar(2003)의 인근 먼지와 장거리 이동 먼지의 입경 사이에서 최대점이 나타난 것으로 볼 수 있다. 야마구치 시의 조대입자 최대점은 앞서 지적한 장거리 이동 먼지의 최대점과 거의 같다. 1 μm 미만 입자의 최대점은 인위적 오염의 결과로 해석하였다.

2.2 황사기간 입자상 물질의 농도 변화

Chun *et al.* (2001)은 1998년 봄 서울과 안면도에서 0.3~25 μm 까지 먼지의 수농도를 측정하였다. 황사가 심할 때 주로 1.35~10 μm 범위 입자가 증가하였으며 특히 2.23~10 μm 범위의 입자는 두 지점의 농도 사이에 상관성이 커서 ($r > 0.8$) 발원지의 영향이 유사하였다. 10 μm 이상 입자는 황사기간에도 황사와 상관없이 일변화가 컸으며 서울에서 농도가 높아 국지 발생 먼지를 원인으로 생각하였다. 흥미로운 현상의 하나는 황사기간 0.5 μm 미만 입자수의 감소이다.

Wu *et al.* (2009)은 북경에서 2004~2006 18개 황사 기간에 3 nm부터 10 μm 까지 입자의 수농도를 측정하였으며 이들을 2가지 타입으로 구분하였다. 18개 중 11개가 속한 타입 1에서는 풍속이 4 m/s 이상 높고, 1 μm 이상 조대입자의(부피) 분율이 70% 이상 높은 데 비하여 타입 2에서는 풍속이 낮고 조대입자 분율도 55%로 상대적으로 낮았다. 타입 1의 경우 황사시작 2시간 전에는 미세입자(부피) 농도가 높았으나 황사시작 1시간 후에는 미세입자 농도가 감소하고 조대

입자 농도는 크게 높아졌다. 저자들은 광물먼지가 조대입자 농도를 높인 반면 강한 바람이 오염입자를 밀어낸 것으로 해석하였다. 타입 2 황사에서도 조대입자가 증가하였으나 바람이 약하여 미세입자 감소는 뚜렷하지 않았다.

황사기간 국지 발생먼지를 직접 언급한 연구는 많지 않다. Yuan *et al.* (2008)은 2001, 2002년 3~4월 북경에서 TSP를 측정하였으며 측정기간 6차례 황사를 관측하였다. 수용모델인 PMF (Positive Matrix Factorization) 모델을 이용하여 외부로부터 유입되는 토양먼지와 국지적으로 발생하는 재비산먼지를 포함하여 8개의 오염원을 구분하였다. 대체로 황사로 인하여 먼지 농도가 높을 때 토양먼지 유입과 비산먼지 발생이 많았는데, 가장 황사가 심하였던 2002. 3. 20~21 중 이틀째인 21일에는 전체 농도의 60%가 국지 발생이었다. 국지발생 먼지에서는 Mg, Ti, Ca, Al 등의 지각(crustal) 원소와 함께, 상대적으로 Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ 등 수용성 이온의 농도가 높았다. 국지발생 먼지의 배출원으로는 도로 재비산, 비포장도로 비산, 건설공사장과 농업활동 등을 추정하였다.

우리나라도 $\text{PM}_{2.5}$ 환경기준을 준비하며 황사가 $\text{PM}_{2.5}$ 에 미치는 영향에 관심이 많다. 황사가 기본적으로 조대입자이므로 황사가 유입되면 조대입자가 많아지기 때문에 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 감소한다(Won *et al.*, 2010). 그러나 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 자체의 변화를 이야기하기는 까다로운 점이 있다. 무엇보다 황사에 대비되는 비황사 때의 대기 조건이 같지 않다. 앞에서 황사 때 1 μm 이하 미세입자의 수농도 혹은 부피 농도의 감소를 이야기하였는데 Wu *et al.* (2009)을 보면 황사 전 인위적 오염에 의하여 $\text{PM}_{2.5}$ 가 높았다. 황사만을 놓고 본다면 많은 입자가 유입되므로 $\text{PM}_{2.5}$ 역시 증가될 가능성도 크다(Kim and Kim, 2003; Kim *et al.*, 2003). 다만 조대입자가 주로 증가하므로 황사가 대형화하여 PM_{10} 이 많이 증가할수록 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 차이는 커질 수 있다. 실제 2002년 4월 초 고산에서는 대형황사와 함께 PM_{10} 이 크게 상승하였으나 $\text{PM}_{2.5}$ 변화는 두드러지지 않았다(Kim *et al.*, 2007).

3. 미량원소

3.1 지각원소와 오염성분

표 1은 1998년 3월부터 5월까지 서울기상관측소에

Table 1. Chemical composition of PM₁₀ measured in Seoul in spring 1998 by event^a.

	Nondust	Dust	Heavy dust	Dust/nondust	Heavy dust/ non-dust	Heavy dust/ dust
(μg/m ³)						
TSP	83	117	238	1.41	2.87	2.03
PM ₁₀	58	78	172	1.34	2.97	2.21
NO ₃ ⁻	8.04	13.14	8.16	1.63	1.02	0.62
SO ₄ ²⁻	7.28	12.76	11.16	1.75	1.53	0.87
NH ₄	4.50	5.51	3.87	1.22	0.86	0.70
Na ⁺	0.77	0.88	1.29	1.15	1.68	1.46
K ⁺	0.36	0.56	0.63	1.54	1.72	1.12
Mg ²⁺	0.08	0.13	0.33	1.54	3.95	2.57
Ca ²⁺	0.68	1.32	4.66	1.93	6.85	3.55
Na	0.50	0.63	1.59	1.26	3.16	2.50
Mg	0.33	0.71	3.07	2.16	9.29	4.30
Al	1.81	2.44	10.47	1.35	5.79	4.29
Ca	1.18	1.91	6.89	1.62	5.85	3.61
Fe	1.20	2.06	6.42	1.72	5.36	3.12
(ng/m ³)						
Mn	36.4	66.4	152.0	1.83	4.18	2.29
Cr	11.85	10.39	9.58	0.88	0.81	0.92
Co	0.99	1.70	2.32	1.71	2.33	1.36
Ni	6.36	12.08	7.34	1.9	1.15	0.61
Cu	38.3	53.4	30.2	1.39	0.79	0.56
Zn	191.1	241.6	95.8	1.26	0.50	0.40
Cd	2.10	3.70	1.24	1.77	0.59	0.34
Pb	58.7	109.5	76.0	1.86	1.29	0.69

^aFrom Tables 1, 2, and 4 in Choi *et al.* (2001)

서 TSP와 PM₁₀을 측정된 결과이다(Choi *et al.*, 2001). 35개 시료 중 9개 시료를 황사 때 채취하였으며 7개를 보통 황사, 2개를 심한 황사로 분류하였다. TSP, PM₁₀과 함께 Mg²⁺, Ca²⁺, Na, Mg, Al, Ca, Fe, Mn 등이 비황사부터 심한 황사까지 차례로 농도가 높다. 이들 물질 외에도 K⁺, Co가 농도가 높으나 보통 황사부터 심한 황사까지 황사 강도에 따른 농도 증가가 즉, 심한 황사/보통 황사 비가 TSP, PM₁₀에 미치지 못한다. 황사 강도에 비례하여 농도가 높은 지각물질과 달리 황산염, 질산염, 암모늄염 등 2차 생성 이온과 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb 등 유해 중금속은 보통황사 때 가장 높고 암모늄염, Cu, Zn, Cd는 심한 황사 때가 비황사 때보다도 낮다. Cr은 비황사 때가 가장 높다. 역계적 분석 결과, 보통 황사가 관찰된 4월 14일에는 중국의 동해안 공업지대를 지나 서쪽으로부터 계적이 유입된 데 비하여 황사가 심하였던 4월 12일에는 북서쪽으로부터 계적이 유입되었다. 인위적 오염물질의 농도가 이동 경로에 따라 결정됨을 보여주는 사례이다.

표 1을 보면 심한 황사/비황사의 비가 대체로 변화가 크지만 Al, Ca, Fe의 값들은 5.7 주변으로 유사하다. 대표적인 지각물질 사이에 비율이 어느 정도 일정함을 알 수 있다. Mori *et al.* (2003, 2002)은 황사의 이동 경로를 따라 중국과 일본의 측정소에서 각각 1998년 4월 14~15일과 2001년 3월 21~24일 TSP와 화학조성을 측정하였다. Al, Ti, Fe, Na, Mg, K, Ca, Mn, Sr, Ba 등은 거리에 따른 농도 감소가 유사하고, Al과의 비로 살펴본 농축인자가 0.5~1.5 사이로 거의 일정하였다. 이에 비하여 Zn, Pb 등은 지각원소에 비하여 농도 감소가 작았고 농축인자가 중국보다 일본에서 자리수 하나가 더 높아 이동 중에 물질이 추가되었음을 나타내었다.

이와 같이 보면 지각원소와 오염물질의 변화가 비교적 명확하다. 그러나 Arimoto *et al.* (2004)이 황토고원 북쪽 Zhenbeitai에서 ACE-Asia 기간인 2001년 4월 PM_{2.5} 중 미량원소를 측정된 결과는 단순하지 않다. 측정 장소가 발원지에 인접한 만큼 대부분 원소의 Al에 대한 비율이 Nishikawa *et al.* (2000)의 황토

CRM (certified reference material)과 유사하였고 많은 물질과 Al의 상관계수가 0.95 이상일 만큼 높았다. 그러나 한편으로 Ag, Bi, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn 등 적지 않은 원소가 Al과 상관성이 없거나 약하였고, 광물먼지에서 기대할 수 있는 수준보다 농축되어 오염의 영향을 암시하였다. 특히 Nishikawa *et al.* (2000)의 CRM에 포함되지 않은 Ag, As, Cd, Co, Sb, Sc는 평균 지각 물질 구성에 비하여 4~10배 농축되었는데 이 중 Sc는 전형적 지각원소이다. 광물 조성의 자연적 변화가 원인일 수도 있으나 농축 인자를 해석할 때 유의하여야 할 부분임에는 틀림없다.

표 1에서 Ca/Al, Fe/Al의 비는 대략 0.7이다. Ca/Al의 비는 지역별로 달라서, 황토고원 1.08~2.70, 북경, 칭따오 등 중국 풍하지역은 0.35~1.60이며, 우리나라는 0.56~1.14, 일본은 0.13~0.71로 풍하지역으로 갈수록 낮다(Cao *et al.*, 2008). 발원지부터 기단을 따라 이동할 때 지각원소의 비율은 거의 일정하다(Mori *et al.*, 2003, 2002). 이와 같이 본다면 Ca의 비율이 하류로 이동하며 낮아진 것은 성격이 다른 기단이 혼합된 결과일 수 있다. 아시아 지역의 Ca/Al 비는 아프리카 먼지의 0.15~0.38보다 월등하게 높으며, 산성물질을 중화시킴으로써 지역의 산성화 방지에도 기여할 수 있다. Zhang *et al.* (1997)은 중국의 발원지를 서부 사막과, 먼지가 많은 북부 사막, 먼지가 상대적으로 적은 북부 사막으로 구분하고, Fe/Al, Mg/Al, Sc/Al 등의 비가 다름을 지적하였다. Bates *et al.* (2004)은 고비지역에 비하여 타클라마칸 지역에서 Fe/Al, Mg/Al 비가 크다는 사실로부터 2001년 4월 초 ACE-Asia 측정 기간 동해는 고비지역 황사에 앞서 타클라마칸 사막 황사의 영향을 받은 것으로 추정하였다.

Sun *et al.* (2005)은 2002년 봄 중국 북경에서 2차례 황사를 측정하였다. 3월 20~22일의 DS (dust storm) I은 오염이 심한 서쪽으로부터 유입되었고 4월 6~8일과 11일의 DS II는 오염이 덜한 북쪽 내지 북서쪽으로부터 유입되었다. 3월 20일에는 먼지 농도가 특히 높아 TSP 10,900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 1,390 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승하였다. 황사 때 Al, Ca, Fe, Mg, Na 등 지각원소가 크게 증가하였다. 시기에 따라 농도가 변하였으나 Fe/Al 비는 지각물질의 조성고 거의 같았다. Fe와 달리 Ca/Al 비는 지각물질과 조성이 달랐다. 비황사 때는 상관성도 크게 높지 않는데 공사장 먼지 등의 영향 때문으

로 추정하였다. 오염성분인 As는 DS I 때 가장 높았고, Pb는 NDS (non-dust storm)와 DS I이 비슷하게 높았다. NDS, DS I과 달리 DS II 때는 As와 Pb가 Al과 상관성이 높았는데 이들의 일부가 지각 기원이거나 오염된 토양이 재비산되며 혼합된 것으로 추정하였다.

3.2 중금속

Park *et al.* (2003)은 1993년부터 1996년까지 제주도 고산에서 측정된 TSP 중 Al, Ca, Fe, Ti, Zn, Mn, Cr, Cd, Ni, Cu, Pb, V 등 12개 미량원소 변화를 조사하였다. 황사기간 Al, Fe, Ca, Ti, Zn, Pb 등의 증가는 통계적으로 유의하였으나 나머지 원소의 증가는 통계적으로 유의하지 않았다. 유해 중금속 중에서는 Pb만이 증가하였고 다른 원소들은 지각성분이었다.

Hsu *et al.* (2005)은 2002년 3월부터 2003년 3월까지 대만 타이페이 중앙기상대에서 PM₁₀, PM_{2.5} 시료를 채취하여 Al, Ca, Ti 등 지각원소와 Pb, Cd, Zn 등 유해물질을 분석하였다. 2002년 봄 7차례 황사 유입을 Al, Ca의 농도 상승과 역계적 분석으로 확인하였다. 전반적으로 Pb, Cd는 장거리 이동의 영향으로 겨울에 높은 데 비하여 Zn은 차량 등 인위적 배출의 영향으로 여름에 높았다. Pb, Cd, Zn은 황사기간에 일부 고농도가 관찰되었으나 지각물질이 주성분인 황사의 희석 효과로 3, 4월에는 농축인자가 낮았다. 이들은 특히 겨울에 미세입자에 존재하나 황사가 심할 때는 40% 이상 조대입자에 존재하였다. Pb를 장거리 이동의 지표로 하여 Cd/Pb, Zn/Pb 비를 조사한 결과 황사 때 낮고 여름 몬순기간에 높았는데, 여름 몬순기간의 이들 비는 소각장 주변의 측정값과 유사하였다. 중국은 2000년 이전까지 사용하였던 유연휘발유와 석탄 연소 때문에 토양에서 Pb가 높다고 생각하였다.

Kim *et al.* (2003)은 2001년 봄 세종대에서 PM₁₀과 PM_{2.5} 시료를 채취하여 Al, Fe, Ca, Mg, Ti 등 지각원소와 Pb, Cr, Cd, Cu, Ni 등 유해 중금속 등 20개 미량원소를 분석하였다. 미세입자의 S와 조대입자의 Pb, Cd 등을 제외하고 모든 원소가 비황사 때보다 황사 때 높았다. Al, Fe, Ca, Mg, Ti 등 지각원소가 특히 황사 때 높았는데 조대입자보다 미세입자에서 농도 증가가 두드러졌다. 황사 때 총 먼지 농도가 크게 증가함을 감안하여 원소 농도를 먼지 농도로 나눈, 먼지 중 분율의 변화를 조사하였다. 지각원소는 황사 때 분율이 비황사 때보다 높은 데 반하여 다른 미량원소

는 황사 때 분율이 비황사 때보다 낮았다. 대부분 유해 중금속은 황사, 비황사에 상관없이 미세입자 비율이 높았다. 지각원소는 미세입자 중 농도가 높아져도 F/C(fine/coarse) 비가 0.5 정도인 데 비하여 Pb, Cd는 F/C 비가 각각 비황사 때 2.8, 2.2보다 황사 때 4.5, 1.9로 크게 높았다.

Kim *et al.* (2006)은 2001년부터 2004년까지 봄철 세종대에서 20개 미량원소를 측정 한 후 Pb만을 별도로 살펴봐왔다. Kim *et al.* (2003)에서 비황사 때보다 황사 때 F/C 비가 크게 높았던 것이, 미세입자 중 농도가 거의 변화가 없었던 데 비하여 조대입자 중 농도가 감소하였기 때문이다. 그러나 이와 같은 변화는 해에 따라 달랐다. 역제적 분석 결과 제적이 황해나 북한을 지날 때 황사가 관찰되었는데 Pb 농도는 비황사 때보다 낮았다. 전체적으로 Pb 농도는 제적이 정체되어 국지 영향이 강할 때 가장 높았다. Kim *et al.* (2008)은 Cd를 별도로 분석하였다. Cd 역시 미세입자에 주로 존재하나 Pb만큼은 아니어서 황사 때 조대입자 중 농도가 비황사 때보다 높았다. 미세입자 중 농도는 반대로 비황사 때가 높았다. 제적별로는, 황사가 황해를 지날 때 조대입자 농도가 가장 높아 PM₁₀ 중 농도가 가장 높았고 황사가 북한을 지나 북쪽으로부터 유입될 때는 조대입자 중 농도도 가장 낮았다.

4. 무기 이온

4.1 사례 연구

앞의 표 1에서는 Mg²⁺, Ca²⁺ 등 지각물질이 황사 강도에 따라 농도가 높아짐은 지적하였다. 표 1을 보면 이들 뿐 아니라 Na⁺, K⁺도 황사 강도에 비례하여 농도가 높다. Na⁺는 해염 기원이 보통이다(Cheng *et al.*, 2005; Fang *et al.*, 1999). 1992년부터 1999년까지 제주도 고산에서 TSP 중 이온농도 변화를 조사한 Park *et al.* (2003)에서도 황사 때 다른 이온은 증가하였으나 암모늄염과 함께 Na⁺는 증가하지 않았다. 고산이 섬에 위치하여 상시적으로 해염의 영향을 받기 때문일 수 있다. 그러나 Yuan *et al.* (2008)에서 Na⁺는 황사, 비황사 시기 모두 농축 인자가 1~3로, Al, Ca²⁺, Mg²⁺ 등 지각물질과 같이 변하였다. Cao *et al.* (2008)은 황토고원 토양시료의 수용성 이온 중 Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺ 등의 분율이 높았는데 Cl⁻과 Na⁺은 풍상

층의 Qaidam 염수호 염분 등을 원인으로 추정하였다. 그러나 표 1의 Na⁺는 Ca²⁺, Mg²⁺ 등 지각물질보다 변화폭이 작아 해염의 영향이 혼합된 것으로 보인다.

K⁺는 바이오매스 연소의 지표이며 암모늄염, 질산염 등과도 상관성이 있다(Lee *et al.*, 2003). 표 1에서 K⁺는 2차 이온이 높은 보통 황사 때 높기보다 황사 강도에 따라 농도가 높아지는 모습이어서 지각물질에 가깝다(Cao *et al.*, 2008; Arimoto *et al.*, 2004). 하지만 K⁺ 역시 지각물질에 비하여 변화폭이 작다.

암모늄염은 황산염, 질산염과 함께 보통황사 때 증가하였으나 심한 황사 때는 오히려 감소하였다. 심한 황사 때 암모늄염의 농도는 비황사 때보다도 작는데 다량의 양이온이 유입되면서 질산암모늄이 휘발하고 질산염이 이들과 결합하였기 때문이다(Lee *et al.*, 2008). 같은 이유로 염기성의 지각 물질이 많을 때 조대입자에서 질산염의 농도가 증가되는 현상은 쉽게 예상할 수 있다(Won *et al.*, 2010). 그러나 Ooki and Uematsu (2005)는 액상반응이 기체-고체 반응보다 빠르기 때문에 강우가 있으면 조대입자에서 황산염 농도가 증가할 수 있음을 지적하였다. Kim and Park (2001)에서도 초기에 약한 강우가 있었으며, 황사 때 조대입자에서 질산염도 증가하였지만 황산염의 증가가 더욱 컸다.

2001년 봄 ACE-Asia 기간 동해상에서 이온을 측정 한 Bates *et al.* (2004)에서는 황사가 유입될 때 미세입자 중 황산염이 감소한 반면 조대입자 중 황산염이 증가하였다. Song *et al.* (2007)은 라그랑지안 광화학 모델을 이용하여 ACE-Asia 항공 측정 사례를 분석하였다. 황사의 영향이 가장 컸던 시기에 미세입자 중 Ca²⁺와 결합한 황산염과 질산염의 농도가 낮았으나 조대입자 중 Ca²⁺와 결합한 이들 산성 이온의 농도는 훨씬 높았을 뿐 아니라 계속 증가하였다. 미세입자가 표면적이 넓어 개개 입자의 반응성이 크나 대형 황사가 유입되며 조대입자의 개수가 압도적으로 증가하여 개개 반응성이 낮더라도 전체 반응성이 커지기 때문이다.

Mori *et al.* (2003)은 2001년 3월 21~24일 중국 북경과 일본 야마구치 시에서 다단 채취기를 이용하여 입경별 화학조성을 측정하였다. 지각물질의 분율은 이동 중 조성이 크게 변하지 않으므로 오염물질의 농도가 Al 농도에 비례하면 오염물질이 황사의 질량 혹

Table 2. Concentrations of total mass and secondary ions in fine and coarse particles during the dust event in March 21 ~ 24, 2001 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)^a.

	Beijing		Yamaguchi	
	PM ($\leq 2.1 \mu\text{m}$)	PM ($\geq 2.1 \mu\text{m}$)	PM ($\leq 2.1 \mu\text{m}$)	PM ($\geq 2.1 \mu\text{m}$)
TSP	60	790	109	195
SO_4^{2-}	6.2	12.5	8.9	4.4
NO_3^-	3.62	3.92	0.95	6.06
NH_4^+	2.97	1.39	2.69	-

^aExcerpted from Table 4 in Mori *et al.* (2003)

은 부피에 따라 변하고, (구형의 입자를 가정하여) Al/입경에 비례하면 황사의 표면적에 따라 변하는 것으로 해석하였다. 질산염은 황사의 표면적에 비례하여 표면에 분포하는 모습이였다. 북경에서는 황산염이 입자 내 존재하였으나 야마구치에서는 입자 내부뿐 아니라 표면에도 분포하였다. 북경에서는 조대입자 비율이 93%였고 질산염의 52%, 황산염의 67%가 조대입자에 존재하였다(표 2). 야마구치에서는 조대입자 비율이 64%였고 질산염은 86%가 조대입자에 존재하였으나 황산염은 암모늄 이온과 함께 86%가 미세입자에 존재하여 도시오염의 영향을 암시하였다.

4.2 생성 및 변환 과정 연구

Hwang and Ro (2006)는 2002년 11월 11일 춘천에서 채취한 입자를 개별적으로 관찰하였다. 전체 178개 입자 중 대기 중에서 반응한 것으로 관찰된 입자는 81개였으며 54개가 탄산칼슘, 26개가 해염이었다. 반응한 탄산칼슘은 황산염이 일부 있으나 대부분이 질산염이었고 수분을 함유하였다. 모든 해염 입자는 반응하였고 많은 입자가 물방울 형태였다. Hwang *et al.* (2008)은 2004년 3월 10일부터 12일까지 춘천에서 채취한 $1 \mu\text{m}$ 이상 입자의 형태를 시간대별로 조사하였다. 황사 전의 조대입자에서는 해염의 비중이 컸으나 황사가 유입된 후 규산알루미늄(aluminosilicate, Al_2SiO_5), 산화 규소 등 지각물질의 비중이 증가하였다. 황사 전 탄산칼슘은 반응된 입자가 많았으나 황사와 함께 탄산칼슘의 양이 증가하면서 미반응 탄산칼슘의 비율이 높아졌다.

상대습도가 17% 정도로 낮아도 탄산칼슘은 기체상 질산과 반응하여 질산칼슘을 형성한다(Krueger *et al.*, 2003). 질산칼슘은 흡습성이 있을 뿐 아니라 수분을

흡수하여 용해되므로 수용액이 입자 내부로 침투하여 탄산칼슘이 소진될 때까지 반응이 진행될 수 있다. 이와 같은 형태의 반응은 입자 표면에 생성물이 축적되지 않고, 순수한 기체-고체 반응 대신 액상 반응이 병행하므로 반응이 빠르다. 황산염의 생성도 유사하나 질산칼슘과 달리 황산칼슘은 흡습성이 있어도 용해도가 낮아 액상 반응이 진행되지 못하고 반응이 제한된다(Sullivan *et al.*, 2007).

먼지입자의 화학적 변환과 2차 산성물질의 생성과 관련하여서는 아직도 논란이 많다. 첫째는, 화학적 변환의 정도이다. Zhang and Iwasaka (1999)와 Zhang *et al.* (2003a)은 각각 중국 북경과 청도에서 개별 먼지 입자를 조사하였다. 어느 경우나 황사 때 황산염과 질산염 입자 수가 황사가 없을 때 도시 오염에 의한 입자 수보다 크게 작아 황사에 의한 2차 생성은 거의 없었다. 발원지부터 측정 지점에 이르는 중에 SO_2 , NO_x 등 전구물질 농도가 낮고 습도도 20~24% 정도로 낮기 때문으로 해석하였다. 반면 일본 교토에서 먼지 입자를 조사한 Ma *et al.* (2001)은 모든 황사 입자에서 황을 검출하였고 황사 때 황의 농도는 비황사 때보다 5배 높았다. 쓰쿠비에서 먼지 입자를 조사한 Matsumoto *et al.* (2006)은, 질산염이 기단의 기원에 관계없이 언제나 관찰되는 데 비하여 황산염은 대륙으로부터 황사가 유입될 때 불소 등 석탄연소 배출 성분과 함께 주로 높아 황사를 황 성분의 주요 성분으로 보았다.

Song *et al.* (2007)은 역계적을 이용하여, 2001년 봄 ACE-Asia 기간 황해와 일본 큐슈 남동쪽 바다 위에서 PILS (Particle-into-Liquid Sampler)를 이용하여 항공 측정된 결과를 분석하였다. 황사에서 칼슘과 마그네슘 이온이 주로 탄산염과 결합되어 있으므로 칼슘, 마그네슘 이온과 탄산염의 당량 농도가 차이를 보인다. 탄산염이 질산염이나 황산염으로 치환된 것으로 해석하였다. 궤적이 오염이 덜한 지역을 지났거나 오염지역을 지났어도 측정지점까지 거리가 가까울 때는 탄산염이 거의 보존되나, 오염지역을 지난 후 상당한 거리를 이동한 큐슈 남동쪽 항로에서는 탄산염의 치환 비율이 높았다. Ooki and Uematsu (2005)는 2001년 3월 일본 도쿄와 일본 동쪽 북서태평양에서 다단입팩터 등을 이용하여 이온을 측정하였다. 이온들 간의 수지식을 이용하여 황사 입자와 결합한 산성물질의 총량을 산출하였다. 도쿄에서 오염물질의 농

도가 높고 먼지 농도도 더 높았음에도 불구하고 먼지 중 산성물질의 총량은, 반응시간이 충분한 북서태평양에서 더 많았다.

두 번째는 황산염과 질산염의 생성 과정이다. 칼슘이온의 경우 질산염이 황산염보다 조해성이 커서 반응에 유리함은 이미 지적한 것과 같다. 이에 따라 리시리 섬에서 측정된 Matusmoto *et al.* (2003), 춘천에서 측정된 Hwang and Ro (2006)와 Hwang *et al.* (2008) 등에서 질산염이 황산염보다 많았다. 반면 Ooki and Uematsu (2005)와 Kim and Park (2001)에서는 강우의 영향으로 조대입자에서 황산염 피크를 발견하였다. 앞에서 Ma *et al.* (2001), Matsumoto *et al.* (2006)은 강우와 상관없이 황사 때 황산염이 많았다. Zhang *et al.* (2003b)은 2차 이온이 적었던 중국 북경, 청도와 달리 일본 큐슈의 구마모토에서는 91% 이상 먼지 입자에 황산염이, 27% 이하의 먼지 입자에 질산염이 포함되었다. SO₂ 배출이 많은 중국으로부터 먼지 플룸이 바다를 지나오며 황산염 생성이 촉진되었기 때문으로 추정하였다. Sullivan *et al.* (2007)은 광물질의 영향에 주목하였다. 이들이 동해상에서 채취한 먼지 입자에서 질산염은 탄산칼슘이 주성분인 방해석 (calcite, CaCO₃), 백운석 (dolomite, CaMg(CO₃)₂)과 결합하였다. 그러나 규산알루미늄이 풍부한 입자에는 황산염이 축적되었는데 규산알루미늄 입자 중 철 성분이 SO₂로부터 황산염으로의 전환 반응에 촉매 역할을 하기 때문으로 설명하였다.

5. 잔류성 유기오염물질

잔류성 유기오염물질 혹은 POPs (persistent organic pollutants)는 강한 독성과 함께, 미량과 잔류성, 지용성, 반휘발성 (semi-volatile) 등의 특징으로 인하여 다른 오염물질과 구분된다. POPs는 두 가지 관점에서 황사와 연관된다. 첫째, 중국은 가장 강력한 POPs 발생국가 중 하나이다. POPs는 살충제, 산업용 화합물, 부산물 등으로 구분된다 (UNEP, 2001). 살충제나 산업용 화합물은 경작지 면적이나 인구수에 비례하는 것이 보통이므로 (Breivik *et al.*, 2004) 중국의 배출이 많을 것을 쉽게 예상할 수 있다. 부산물인 PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons), PCBs (polychlorinated biphenyls), 다이옥신 등은 연소과정에서 배출된다. 연

소배출 SO_x, NO_x와 유해 중금속의 장거리 이동을 걱정한다면 PAHs와 다이옥신 등에 관심을 갖는 것은 당연하다. 둘째, 많은 POPs가 반휘발성 물질로 기체로 존재할 때보다 입자상에 존재할 때 안정하다. 분자량이 커서 입자에 주로 존재하는 물질은 물론 분자량이 작아 기체에 존재하는 물질도 입자상 물질의 양이 많아지면 기체-고체 평형에서 입자상 물질로 이전될 수 있다 (Pankow, 1987; Yamasaki *et al.*, 1982). 전자는 입자상 물질이 황사와 함께 이동할 수 있고 후자는 황사가 운반체가 될 수 있다.

Tamamura *et al.* (2007)은 2003년 4월부터 1년간 일본 카나자와 지역에서 입경별 PAHs를 측정하였으며 측정 기간 4차례 황사를 관측하였다. 대체로 미세입자와 조대입자의 PAHs가 함께 변화하였으나 4월 9~25일의 황사기간에는 거의 모든 PAH가, 미세입자 중 농도가 감소하는 대신 조대입자 중 농도가 증가하였다. 기체상 PAHs가 황사의 조대입자로 이전될 가능성을 생각할 수 있었다. 그러나 고분자 PAHs는 흡착속도가 느려, 황사가 발원지로부터 일본으로 이동하는 중에 검출이 가능할 만큼 입자에 축적되기 어려웠다. 결국, 조대입자 중 고분자 PAHs는 발원지의 오염된 토양으로부터 비롯된 것으로 판단하였다. 실제 황사의 이동 궤적을 조사한 결과 다른 황사는 몽골이나 중국 북부가 발원지인 데 반하여 4월의 황사는 중국 중부와 동쪽의 황토고원이 발원지여서 인근 공업지역의 영향을 의심할 만 하였다.

Guo *et al.* (2003)은 2001년 6월부터 2002년 5월까지 중국 칭따오에서 TSP를 측정하였다. 2002년 3월과 4월 2차례 황사를 관측하였다. 황사기간 PAHs 농도는, 화석연료 사용이 많은 겨울철보다 낮을 뿐 다른 계절보다 높았으며 조성은 거의 동일하였다. Fang *et al.* (2005)은 2001년 8월부터 2002년 4월까지 대만 중부지방에서 대용량 dichotomous 채취기를 이용하여 미세입자와 조대입자 중 PAHs를 측정하였다. 미세입자 중 PAHs는 겨울에 높았으나 조대입자 중 PAHs는 3, 4월에 높았다. 겨울과 봄 모두 벤젠고리 5개 이상 고분자 물질이 가장 많았다. 겨울에는 조대입자에서 벤젠고리 2, 3개 저분자 물질의 농도가 낮았으나 3, 4월에는 이들 물질이 벤젠고리 4개인 중간 분자 물질보다 많았으며 황사를 원인을 지목하였다.

Ghim *et al.* (2003)은 2001년 가을과 2002년 봄 고산에서는 대용량 채취기를 이용하여 기체상과 입자

상 다이옥신을 측정하였다. 2001년 가을 오염물질 농도가 높았을 때는 퓨란의 농도가 높은 데 비하여 황사기간에는 OCDD (octachlorodibenzo-p-dioxin)의 농도가 주로 높았다. 다이옥신은 보통 90% 이상이 미세입자에 존재하며 고분자의 OCDD는 더욱 그러하다. 따라서 조대입자가 많은 황사 때 OCDD가 높은 것은 의외였다. Lee *et al.* (2007b)은 2002년 3월 21일부터 한달 동안 포항에서 대용량 채취기를 이용하여 다이옥신을 측정하였다. 측정 기간 중 3월 21~23일과 4월 8~10일 2차례 대형 황사가 유입되었다. TSP는 비황사 때 $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 황사 때 $457 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 4배 가까이 증가하였다. 그러나 다이옥신 농도는 각각 $2.05 \text{ pg}/\text{m}^3$ 과 $2.45 \text{ pg}/\text{m}^3$ 으로 큰 차이가 없었으며 동종체 분포도 다르지 않았다. 하지만 비황사 때는 기온에 따라 입자상 분율이 감소한 데 비하여 황사 때는 이와 같은 경향이 나타나지 않았다.

Chi *et al.* (2008)은 2006년 봄 대만 북쪽 해안과 타이페이에서 대용량 채취기를 이용하여 기체상과 입자상 다이옥신을 측정하였다. 3월 13~19일 기간 황사를 관측하였고 황사기간 다이옥신 총 농도가 북쪽 해안에서는 2.5배, 타이페이에서는 2.1배 증가하였다. 황사 전 다이옥신 농도가 다른 아시아 지역보다 낮았기 때문에 중국 남부 Zhejiang과 Guangdong 지방에 밀집된 폐기물 소각로를 배출원으로 의심하였다. 그러나 입자상 농도는 북쪽 해안보다 타이페이에서 크게 증가하였는데 타이페이 시 주변에 위치한 소각로 배출을 원인으로 추정하였다. 이들 측정에서도 제주도 고산에서와 같이 황사기간 OCDD가 크게 증가하였다.

6. 광학 특성

6.1 발원지의 대기환경

광학 특성 조사에는 라이다와 같이 레이저를 이용하기도 하나 많은 기기들이 태양광을 이용한다. 태양광을 이용할 경우 지표에서는 낮에만 측정이 가능하다는 제한이 있다. 그러나 별도의 에너지가 필요하지 않으므로 약간의 자동화 기능만 갖춘다면 장기간 무인 관측이 가능하다. 동일한 원리에 의하여 위성 탐사된 광학 측정기기는 넓은 범위를 장기간 관측할 수 있다. 광학 측정 자료 중 가장 역사가 오랜 것은 태

양복사 측정이다. 1950년대 말부터 전세계적으로 측정이 시작되어 1960년대부터는 신뢰성 있는 자료가 모아지고 있다(Streets *et al.*, 2009). 최근에는 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer), MISR (multiangle imaging spectroradiometer) 등 위성 센서로부터 자료를 얻을 수 있다(Mishchenko *et al.*, 2009). 당초에는 위성 관측 자료를 검증하기 위하여 시작되었으나 근래에는 에어로졸의 광학 특성과 크기 분포 등을 파악하기 위하여서도 광범위하게 이용되고 있는 AERONET (Aerosol Robotic Network, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)과 SKYNET (Skyradiometer Network, <http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/>) 등의 자료도 이용할 수 있다.

Eck *et al.* (2005)은 타클라마칸 동쪽의 Dunhuang, 고비 사막 내 Dalanzadgad, 황토고원 북쪽의 Yulin 등 동아시아의 AERONET 자료를 분석하였다. 월평균 AOD는 북경이 가장 높고 Dalanzadgad가 가장 낮았다. Yulin을 제외한 다른 지점의 옹스트롬 지수는 4월에 가장 낮았다. 그러나 Dalanzadgad의 4월 월평균도 0.82 정도로 높아 사막면지가 가장 심한 시기에도 미세 에어로졸의 영향이 상당하였다. 실제 Dalanzadgad는 3~6월에 낮을 뿐 가을, 겨울에는 다른 지점보다 옹스트롬 지수가 크게 높았다. 음식과 난방을 위하여 석탄을 사용하고, 북쪽과 북서쪽 시베리아 도시와 유정의 가스 소각 (flaring)으로부터 오염물질이 유입되며, 유럽으로부터 장거리 이동의 영향도 가능하였다. 반면 2002년 Yulin은 발원지로부터 지속적으로 먼지가 유입되어 옹스트롬 지수가 월등하게 낮았다. 2001년 봄철 Dunhuang의 단산탄 반사율은 사하라 서쪽의 Cape Verde와 비슷하였으나 440~675 nm의 단파장대에서는 높았는데 미세입자에서 산화철 함량이 낮기 때문으로 해석하였다.

Kim *et al.* (2004)은 고비사막 북쪽의 Mandalgovi, 타클라마칸 동쪽의 Dunhuang, 고비 남쪽의 도시인 Yinchuan 등 동아시아의 SKYNET 자료를 분석하였다. Mandalgovi의 경우 먼지의 영향으로 옹스트롬 지수가 낮을 때 AOD가 높았으나 AOD가 작을 때는 옹스트롬 지수가 크게 높아 미세입자의 영향도 상당하였다. Yinchuan에서도 옹스트롬 지수가 낮을 때는 먼지의 영향을 볼 수 있었다. 그러나 AOD가 0.5보다 클 때는 습도가 높을 때 옹스트롬 지수가 커지며 AOD가 증가하여 2차 생성에 의한 도시오염의 형태를 보

였다. 발원지에 인접한 3곳 중에서는 Dunhuang에서 먼지의 영향이 가장 지배적이었다. 단산란 반사율은 Mandalgovi가 연평균 0.937로 가장 높았고, Dunhuang이 0.904로 가장 낮았다. Yinchuang은 0.913으로 Dunhuang보다 높았으나 봄에는 먼지의 영향 때문에 0.905로 낮았다.

Xu *et al.* (2004)은 2001년 4월 ACE-Asia의 일환으로 Yulin에서 먼지의 물리화학적 특성과 광학 특성을 조사하였다. 측정소 주변에 중요한 오염원이 없었음에도 입자 산란과 흡수계수는 아침 8시와 저녁 18~20시 사이에 최대가 되어 일변화가 명확하였다. 아침과 저녁의 최대는 각각 인근의 연소 배출과 국지적 모래 폭풍이 원인이었다. 연소 배출이 지배적일 때 $PM_{2.5}$ 주성분은 유기물질이 41%, 지각물질 29%, 황산염 17%, EC 13% 등이었고 모래폭풍 기간에는 지각물질 약 51%, 탄산염 11%, 유기물질 9.5% 등이었다. 오염의 영향에도 불구하고 단산란 반사율은 0.95로 사우디아라비아, 바레인, Cape Verde 등 다른 사막먼지 지역과 다르지 않았다. 그러나 ACE-Asia 기간 상층에서 항공 측정된 순수한 먼지 때의 ~0.97보다는 낮았다. 먼지의 영향이 지배적일 때 $PM_{2.5}$ 산란 효율은 $\sim 1.0 m^2/g$ 으로 오염이 지배적일 때 $\sim 3.0 m^2/g$ 보다 낮았다. 그러나 먼지의 영향이 지배적일 때 $PM_{2.5}$ 가 4배 높아 산란계수도 1.7배 높았다.

Yu *et al.* (2006)은 2001년부터 2005년까지 중국, 한국, 일본 내 10개 AERONET 지점 황사 자료를 분석하였다. 중국의 황사는 우리나라, 일본에 비하여 AOD가 크고 옹스트롬 지수가 작았다. 옹스트롬 지수는 Dunhuang -0.05 내지 0.16, Yulin -0.03 내지 0.99, 북경 0.04~1.06, 안면 0.5~1.1, 오사카 0.65~1.07로 풍하지역으로 갈수록 증가하였다. 미세오염입자의 유입과 조대입자의 침적이 원인일 수 있다. 단산란 반사율은 우리나라가 0.92, 일본이 0.95 정도로 거의 일정한 데 비하여 중국은 미세입자 흡수가 많아 0.89~0.98까지, 단파장에서는 낮고 파장에 따라 변화가 컸다. Kim *et al.* (2004)은 발원지 인근 측정소 중 Dunhuang의 단산란 반사율이 가장 낮다고 하였으나 Yu *et al.* (2006)에서는 북경, Yulin은 물론 안면보다 높았다. Kim *et al.* (2004)은 발원지를 중심으로 먼지의 흡수성을 강조하였으나 Yu *et al.* (2006)은 도시 오염과 비교하였기 때문으로 볼 수 있다.

6.2 CSHNET (Chinese Sun Hazemeter Network)

중국 대기물리연구소는 2004년부터 GLOBE (Global Learning and Observations to Benefit the Environment)의 일환으로 개발된 간이 sun photometer를 보급하여 CSHNET을 구축하였다(Li *et al.*, 2007). 기기는 북경 인근의 Xianghe에서 CIMEL sun photometer와 비교하여 보정하며 자료는 북경에서 수집하고 검증하였다. 기기 보정과 자료 수집 및 검증을 NASA GSFC (Goddard Space Flight Center)에서 일괄하는 AERONET과 유사한 체계이다. MODIS가 지나가는 시간에 맞추어 10시부터 14시까지, 하루 20번 이상 측정하였다.

Xin *et al.* (2007)은 2004년 8월부터 2005년 9월까지 CSHNET 지점의 AOD와 옹스트롬 지수를 조사하였다. AOD는 티벳고원이 ~ 0.15 로 가장 낮았지만 옹스트롬 지수는 0.06~0.9로 변화가 컸다. 가을과 겨울에 바이오매스 연소로 미세입자가 많았고, 봄, 여름에는 먼지가 많아 조대입자 분율이 높았다. 북동부 벽지의 AOD가 0.19~0.21로 티벳고원 다음으로 낮았으나 옹스트롬 지수가 1.16~1.79로 높아 미세입자의 영향이 컸다. 미세입자는 역시 바이오매스 연소와 함께 화석연료 연소 때문이었다. 겨울에 이들의 영향이 크나 눈과 얼음으로 인하여 AOD가 높지 않았다. 북부 사막 지역은 AOD가 0.24~0.36이었고 옹스트롬 지수는 0.42~0.99였다. 측정기간 먼지 폭풍과 강수량이 모두 평년보다 적어 AOD의 계절 변화가 작았다.

Lee *et al.* (2007a)은 CSHNET과 함께 MODIS 자료를 이용하여 단산란 반사율을 조사하였다. 단산란 반사율의 복원이 AOD와 함께 지표 반사에 민감하여 AOD가 0.4 이상인 값만 분석하였다. 동해안의 공업 지대가 단산란 반사율이 높았다. 반면 북동부 공업지역은 난방을 위한 석탄 사용으로 단산란 반사율이 낮았고, 중국 서부와 황토고원 등 황사 발원지도 단산란 반사율이 낮았다. Du *et al.* (2008)은 2005~2007 기간 CSHNET 15개 지점 자료를 이용하여 발원지와 발원지 부근, 발원지로부터 먼 풍하지역을 구분하여 황사 때와 비황사 때 광학 특성을 비교하였다. 전체적으로는 황사 때 AOD가 33% 증가하고 옹스트롬 지수가 24% 감소하였다. 그러나 비황사와 황사 때 AOD가 각각 0.34와 0.44, 0.46과 0.71, 0.66과 0.81로 발

원지보다 발원지 인근에서 황사의 영향이 훨씬 컸다. 웅스트롬 지수는 발원지에서 멀수록 컸으나 황사에 의한 감소는 발원지, 발원지 부근, 먼 지역이 각각 20, 22, 25%로, 미세입자 분율이 높은 먼 지역에서 황사의 영향이 컸다. 도시와 주변의 전원지역을 구분하였을 때는 도시지역에서 AOD의 증가폭이 컸다.

그러나 이와 같은 결과에서는 몇 가지 유의할 점들이 있다. 첫째, 정교한 기기는 상황이 조금 낫지만 기본적으로 모든 sun/sky radiometer는 에어로졸의 광학 특성을 얻기 위하여 구름의 영향을 제거하여야 하나 황사가 심하면 구름과 구분이 쉽지 않다. 당연히 발원지 혹은 발원지에 가까울수록 측정이 어려운 사례가 빈번할 수밖에 없다. 둘째는 관측시간이다. AERONET이나 SKYNET도 주간만을 측정하므로 야간의 심한 황사를 놓칠 수 있다. CSHNET은 10시부터 14시까지만 측정하므로 황사의 중요한 변화를 놓칠 가능성이 더욱 높다.

7. 결 론

황사는 우리나라의 대기환경 조건을 결정하는 가장 중요한 요소의 하나이다. 국내에서는 2001~2002년의 사례가 황사를 재조명하는 계기가 되었으며, 국제적으로는 2001년 봄 ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) 측정이 기폭제가 되어 연구가 활발하였다. ACE-Asia 기간 국제 학계가 황사를 주목하였던 가장 큰 이유는 황사가 이 지역을 특징짓는 중요한 자연 현상인 데 비하여 연구가 부족하였기 때문이다 (Huebert *et al.*, 2003). 반면 국내의 1차적 관심은 황사의 위해성이었다. 상당 부분 2001~2002년의 강한 황사 때문이나 우리나라 황사 대책과 연구에서는 빈도 증가와 강도 심화를 전제하는 것이 보통이었다.

서울을 기준으로 할 때 우리나라에서 지난 90년 중 가장 황사일수가 많았던 때는 1940년 부근이다. 이후 감소하였다가 1980년대부터 다시 증가하고 있다. 그러나 타클라마칸과 고비 등 중국 주요 발원지의 황사 발생 빈도는 1980년대 이후 감소하고 아시아와 아프리카의 발생량이 감소하면서 1980~1990년대 전세계 발생량도 감소하였다 (Wang *et al.*, 2008; Ginoux *et al.*, 2004). 우리나라의 황사는 일수보다 사

례 수의 증가가 뚜렷하고 사례 수 증가는 상당 부분, 내몽골, 만주 등 우리나라에 인접한 지역으로 발원지 이전과 연관되어 있다. 발원지와 풍하지역의 변화가 다른 것은 흥미로운 현상이나 원인은 명확하지 않다 (Shao and Dong, 2006).

황사는 기본적으로 조대입자이며 장거리이동 황사는 보통 2~4 μm 에서 농도가 가장 높다. 몇몇 연구에서는 황사기간 10 μm 이상 입자의 농도가 증가하였다 (NIER, 2004). 10 μm 이상 입자는 체류시간이 짧기 때문에 풍속이 높아도 장거리 이동이 어려워 국지 발생 먼지일 가능성이 크다. 실제 Chun *et al.* (2001)은 황사 유입과 상관없는 일변화를 보이는 10 μm 이상 입자를 국지 발생 먼지로 판단하였다. 10 μm 이상의 입자가 부유한다면 더 작은 입자도 부유할 수 있다. Yuan *et al.* (2008)의 조사에서는 황사일 국지발생 먼지의 비중이 60%까지 상승하였다. 황사는 주로 조대입자이므로 황사가 유입되면 상대적으로 조대입자 비율이 높아진다. 미세입자 농도 변화는 황사 전 농도 등 다양한 요인에 따라 다르다. Wu *et al.* (2009)에서는 풍속과 조대입자 비율이 높을 때 미세입자 농도가 감소하였는데 대상 사례들을 보면 황사 전 인위적 오염에 의하여 미세입자 농도가 높았다.

중금속은 황사와 관련하여 가장 많이 거론되는 주제이다. 그러나 황사는 지각물질이므로 황사 자체에는 유해 중금속이 거의 함유되어 있지 않다. 황사에 중금속이 함유된다면 발원지 토양이 오염되었거나 이동 중 혼합된 것이다. 황사가 중국 동해안 등 오염 지역을 지나며 중금속의 농도가 높아진다는 사실은 잘 알려져 있다. 당연히 오염지역을 지나지 않은 황사의 중금속 농도는 평소보다도 낮다. 최근에는 광학 측정기기들이 보급되면서 그동안 측정이 어려웠던 발원지에서도 상시 측정 결과들이 보고되고 있다. 고비지역과 같은 경우 가을과 겨울, 주민들의 석탄 사용과 시베리아 도시와 유정 등의 영향으로 미세입자 분율이 높다 (Eck *et al.*, 2005). 도시와 같이 농도가 높지 않지만 오염물질이 침적되면 봄철 황사와 더불어 이동할 수 있다. 고비 남쪽 Zhenbeitai에서 Arimoto *et al.* (2004)이 측정한 결과에서는 PM_{2.5} 중 일부 중금속이 평균 지각물질에 비하여 4~10배 농축되었다.

황산염과 질산염 등 2차 이온도 유해물질이나 유해성이 1차적 관심의 대상인 중금속과 달리 황사기간 이들에 대한 연구는 보편적으로 위해성 조사가

주요 목적이 아니다. 황사기간 2차 이온의 변화는 2가지 관점에서 학문적으로 관심이 크다. 첫째는, 오염지역에서 주로 미세입자에 존재하는 2차 이온이 황사의 조대입자를 만날 때 상호작용이다. 오염지역에서 질산염은 질산암모늄 형태로 미세입자에 존재하지만 조대입자와 함께 양이온이 많아지면 휘발하여 조대입자에서 질산칼슘 등을 형성한다. 둘째는, 2차 생성에 대한 황사 입자의 기여도이다. 황사를 구성하는 광물질 중 탄산칼슘이 주성분인 방해석이나 백운석은 기체상 질산이나 황산과 결합될 수 있다. 질산칼슘은 수분을 흡수하여 용해되며 액상반응으로 이어지는 데 비하여 황산칼슘은 용해도가 낮아 반응이 제한된다. 그러나 황산염도 강우를 동반할 때는 액상반응이 가능하여 조대입자 분율이 높아진다(Ooki and Uematsu, 2005; Kim and Park, 2001).

잔류성 유기오염물질은 중국이 강력한 발생국가이고 입자상에 존재할 때 훨씬 안정된다는 점에서 황사의 영향을 조사하였다. Fang *et al.* (2005)이 봄철 대만에서 저분자 PAHs 농도가 높은 원인으로 황사를 언급하는 등 일부 연구가 황사의 영향을 지적하고 있다. 그러나 대부분 경우 자료가 충분치 않고 인과관계도 명확하지 않다. 가장 중요한 원인은 잔류성 유기오염물질이 장거리를 이동할 때 주로 미세입자에 존재하기 때문이다. 단지, 잔류성 유기오염물질 중 분자량이 상대적으로 작은 물질은 휘발성이 있으므로 황사가 운반체 역할을 할 수 있다. 2002년 봄 고산과 2006년 봄 대만에서 황사기간 OCDD가 증가된 현상의 원인도 명확하지 않다.

광학 특성 부분에서는 발원지의 대기환경과 함께 CSHNET (Chinese Sun Hazemeter Network)을 통하여 중국의 최근 연구 동향을 소개하였다. 대기환경 분야만은 아니지만 Stout *et al.* (2009)의 조사에 의하면 중국인이 제1저자인 황사관련 논문수는 1997년과 2001년 큰 폭으로 증가하여 2005년 이 분야 전 세계 논문의 45%를 차지하였다. 2000~2005 기간 중국어 논문 비율도 25%로, 70%인 영어 논문 다음으로 높았다. 유해 에어로졸이 심각한 중국에서 황사 연구가 활발한 것에 대하여 비판적 시각도 있으나 (Cyranski, 2003) 2001~2002년의 황사를 곧바로 위해성과 연관시켰던 우리나라의 대책과 연구와 달리 바람직한 측면도 많다. 무엇보다 우리의 경우 특히 입자상물질과 관련하여서는, 위해성 여부와 상관없

이, 황사에 대한 이해가 필수적이기 때문이다.

우리만큼은 아니지만 국제 학계에서도 ACE-Asia 이후 광물먼지에 대한 관심이 많이 줄었다. 그러나 ACE-Asia 때 제기되었던 의문들이 모두 해소된 것이 아니기 때문에 ACE-Asia와 같이 우리나라 혹은 동북아시아를 대상으로 대규모 조사사업이 실시된다면 이 지역의 가장 특징적 자연현상인 황사는 다시 한번 핵심 의제가 될 가능성이 충분하다. 이번 총설에서는 지금까지 국내의 관심에 따라 대기환경영향과 유해물질 변화를 다루었다. 앞으로는 중요한 자연현상으로서 황사를 이해하기 위한 방식으로 황사 연구의 지평을 넓힐 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원이 지원한 “발원지의 황사 발생기구 및 이동경로별 황사 발생연구”와 한국외국어대학교 교내학술연구, 그리고 2010년도 정부(교육과학기술부) 재원 한국연구재단 기초연구사업(No. 2010-0012920)의 일환으로 진행되었습니다.

참고 문헌

- Arimoto, R., X.Y. Zhang, B.J. Huebert, C.H. Kang, D.L. Savoie, J.M. Prospero, S.K. Sage, C.A. Schloesslin, H.M. Khaing, and S.N. Oh (2004) Chemical composition of atmospheric aerosols from Zhenbeitai, China, and Gosan, South Korea, during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S04, doi:10.1029/2003JD004323.
- Arimoto, R., Y.J. Kim, Y.P. Kim, P.K. Quinn, T.S. Bates, T.L. Anderson, S. Gong, I. Uno, M. Chin, B.J. Huebert, A.D. Clarke, Y. Shinozuka, R.J. Weber, J.R. Anderson, S.A. Guazzotti, R.C. Sullivan, D.A. Sodeman, K.A. Prather, and I.N. Sokolik (2006) Characterization of Asian dust during ACE-Asia, *Global and Planetary Change*, 52, 23-56.
- Bates, T.S., P.K. Quinn, D.J. Coffman, D.S. Covert, T.L. Miller, J.E. Johnson, G.R. Carmichael, I. Uno, S.A. Guazzotti, D.A. Sodeman, K.A. Prather, M. Rivera, L.M. Russell, and J.T. Merrill (2004) Marine boundary layer dust and pollutant transport associated with the passage of a frontal system over eastern Asia, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S19, doi:10.1029/2003JD

- 004094.
- Brevik, K., R. Alcock, Y.-F. Li, R.E. Bailey, H. Fiedler, and J.M. Pacyna (2004) Primary sources of selected POPs: regional and global scale emission inventories, *Environmental Pollution*, 128, 3-16.
- Cao, J.J., J.C. Chow, J.G. Watson, F. Wu, Y.M. Han, Z.D. Jin, Z.X. Shen, and Z.S. An (2008) Size-differentiated source profiles for fugitive dust in the Chinese Loess Plateau, *Atmospheric Environment*, 42, 2261-2275.
- Cheng, M.T., Y.C. Lin, C.P. Chio, C.F. Wang, and C.Y. Kuo (2005) Characteristics of aerosols collected in central Taiwan during an Asian dust event in spring 2000, *Chemosphere*, 61, 1439-1450.
- Chi, K.H., S.C. Hsu, S.H. Wang, and M.B. Chang (2008) Increases in ambient PCDD/F and PCB concentrations in Northern Taiwan during an Asian dust storm episode, *Sci. Total Environ.*, 401, 100-108.
- Choi, J.C., M. Lee, Y. Chun, J. Kim, and S. Oh (2001) Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul, Korea, *J. Geophys. Res.*, 106, 18,067-18,074.
- Chun, Y., J. Kim, J.C. Choi, K.O. Boo, S.N. Oh, and M. Lee (2001) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2715-2721.
- Chun, Y., J. Kim, K.-O. Boo, and N.-O. Kim (2000) The features associated with the Yellow Sand phenomenon observed in Korea in wintertime, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 16, 487-497. (in Korean with English abstract)
- Clarke, A.D., Y. Shinozuka, V.N. Kapustin, S. Howell, B. Huebert, S. Doherty, T. Anderson, D. Covert, J. Anderson, X. Hua, K.G. Moore II, C. McNaughton, G. Carmichael, and R. Weber (2004) Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: Physicochemistry and optical properties, *J. Geophys. Res.*, 109, D15S09, doi:10.1029/2003JD004378.
- Cyranoski, D. (2003) China plans clean sweep on dust storms, *Nature*, 421, 101.
- Du, W., J. Xin, M. Wang, Q. Gao, Z. Li, and Y. Wang (2008) Photometric measurements of spring aerosol optical properties in dust and non-dust periods in China, *Atmospheric Environment*, 42, 7981-7987.
- Eck, T.F., B.N. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, P. Goloub, H.B. Chen, B. Chatenet, L. Gomes, X.-Y. Zhang, S.-C. Tsay, Q. Ji, D. Giles, and I. Slutsker (2005) Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific, *J. Geophys. Res.*, 110, D06202, doi:10.1029/2004JD005274.
- Fang, G.-C., Y.-S. Wu, J.-C. Chen, P.P.-C. Fu, C.-N. Chang, T.-T. Ho, and M.-H. Chen (2005) Characteristic study of polycyclic aromatic hydrocarbons for fine and coarse particulates at pastureland near industrial park sampling site of central Taiwan, *Chemosphere*, 60, 427-433.
- Fang, M., M. Zheng, F. Wang, K.S. Chim, and S.C. Kot (1999) The long-range transport of aerosols from northern China to Hong Kong - a multi-technique study, *Atmospheric Environment*, 33, 1803-1817.
- Ghim, Y.S., J.Y. Kim, Y. Kim, K.-C. Moon, K.J. Moon, J.S. Han, S.-W. Kim, S.-C. Yoon, and S.-A. Kwon (2003) Concentration variations of persistent organic pollutants in Gosan, Jeju during the polluted period in November 2001 and the Yellow Sand period in spring 2002, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19, 469-490. (in Korean with English abstract)
- Ginoux, P., J.M. Prospero, O. Torres, and M. Chin (2004) Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation, *Environ. Modelling Software*, 19, 113-128.
- Guo, Z.G., L.F. Sheng, J.L. Feng, and M. Fang (2003) Seasonal variation of solvent extractable organic compounds in the aerosols in Qingdao, China, *Atmospheric Environment*, 37, 1825-1834.
- Hsu, S.-C., S.C. Liu, W.-L. Jeng, F.-J. Lin, Y.-T. Huang, S.-C.C. Lung, T.-H. Liu, and J.-Y. Tu (2005) Variations of Cd/Pb and Zn/Pb ratios in Taipei aerosols reflecting long-range transport or local pollution emissions, *Sci. Total Environ.*, 347, 111-121.
- Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima (2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Husar, R. (2003) Local and global dust over North America, 2nd International Workshop on Mineral Dust, September 10-12, Paris, France.
- Hwang, H. and C.-U. Ro (2006) Direct observation of nitrate and sulphate formations from mineral dust and sea-salts using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis, *Atmospheric Environment*, 40, 3869-3880.

- Hwang, H., H. Kim, and C.-U. Ro (2008) Single-particle characterization of aerosol samples collected before and during an Asian dust storm in Chuncheon, Korea, *Atmospheric Environment*, 42, 8738-8746.
- Kim, B.-G. and S.-U. Park (2001) Transport and evolution of a wintertime Yellow sand observed in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 3191-3201.
- Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Take-mura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon (2004) Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, 109, D02209, doi:10.1029/2003JD003387.
- Kim, J. (2008) Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004), *Atmospheric Environment*, 42, 4778-4789.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, C.H. Song, S.-C. Yoon, and J.S. Han (2007) Seasonal characteristics of air masses arriving at Gosan, Korea using fine particle measurements between November 2001 and August 2003, *J. Geophys. Res.*, 112, D07202, doi:10.1029/2005JD006946.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2003) The effects of Asian Dust on particulate matter fractionation in Seoul, Korea during spring 2001, *Chemosphere*, 51, 707-721.
- Kim, K.-H., C.-H. Kang, C.-J. Ma, J.-H. Lee, K.-C. Choi, and Y.-H. Youn (2008) Airborne cadmium in spring season between Asian dust and non-Asian dust periods in Korea, *Atmospheric Environment*, 42, 623-631.
- Kim, K.-H., C.-H. Kang, J.-H. Lee, K.-C. Choi, Y.-H. Youn, and S.M. Hong (2006) Investigation of airborne lead concentrations in relation to Asian Dust events and air mass transport pathways, *J. Aerosol Sci.*, 37, 1809-1825.
- Kim, K.-H., G.-H. Choi, C.H. Kang, J.-H. Lee, J.Y. Kim, Y.H. Youn, and S.R. Lee (2003) The chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events, *Atmospheric Environment*, 37, 753-765.
- Krueger, B.J., V.H. Grassian, A. Laskin, and J.P. Cowin (2003) The transformation of solid atmospheric particles into liquid droplets through heterogeneous chemistry: laboratory insights into the processing of calcium containing mineral dust aerosol in the troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2002GL016563.
- Lee, K.H., Z. Li, M.S. Wong, J. Xin, Y. Wang, W.-M. Hao, and F. Zhao (2007a) Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- Lee, M.-H., E.-J. Han, and Y.-S. Won (1986) Yellow Sand phenomena influence to the atmosphere in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 2(3), 34-44. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.-H., E.-J. Han, C.-K. Shin, and J.-S. Han (1988) A study on the size distribution and chemical component of suspended particulate during the period of sandy dust phenomena, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 4(2), 57-66. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.-J., H. Park, S.-D. Choi, J.-M. Lee, and Y.-S. Chang (2007b) Assessment of variations in atmospheric PCDD/Fs by Asian dust in Southeastern Korea, *Atmospheric Environment*, 41, 5876-5886.
- Lee, T., X.-Y. Yu, B. Ayres, S.M. Kreidenweis, W.C. Malm, and J.L. Collett, Jr. (2008) Observations of fine and coarse particle nitrate at several rural locations in the United States, *Atmospheric Environment*, 42, 2720-2732.
- Lee, Y.-N., R. Weber, Y. Ma, D. Orsini, K. Maxwell-Meier, D. Blake, S. Meinardi, G. Sachse, C. Harvard, T.-Y. Chen, D. Thornton, F.-H. Tu, and A. Bandy (2003) Airborne measurement of inorganic ionic components of fine aerosol particles using the particle-into-liquid sampler coupled to ion chromatography technique during ACE-Asia and TRACE-P, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8646, doi:10.1029/2002JD003265.
- Li, Z., H. Chen, M. Cribb, R. Dickerson, B. Holben, C. Li, D. Lu, Y. Luo, H. Maring, G. Shi, S.-C. Tsay, P. Wang, Y. Wang, X. Xia, Y. Zheng, T. Yuan, and F. Zhao (2007) Preface to special section on East Asian Studies of Tropospheric Aerosols: An International Regional Experiment (EAST-AIRE), *J. Geophys. Res.*, 112, D22S00, doi:10.1029/2007JD008853.
- Ma, C.-J., M. Kasahara, R. Hooller, and T. Kamiya (2001) Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period, *Atmospheric Environment*, 35, 2707-2714.
- Mahowald, N.M., G.D.R. Rivera, and C. Luo (2004), Comment on "Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission" by I. Tegen *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24105, doi:10.1029/2004GL021272.
- Matsumoto, J., K. Takahashi, Y. Matsumi, A. Yabushita, A.

- Shimizu, I. Matsui, and N. Sugimoto (2006) Scavenging of pollutant acid substances by Asian mineral dust particles, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07816, doi:10.1029/2006GL025782.
- Matsumoto, K., Y. Uyama, T. Hayano, H. Tanimoto, I. Uno, and M. Uematsu (2003) Chemical properties and outflow patterns of anthropogenic and dust particles on Rishiri Island during the Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-Asia), *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8666, doi:10.1029/2003JD003426.
- Mishchenko, M.I., I.V. Geogdzhayev, L. Liu, A.A. Lacis, B. Cairns, and L.D. Travis (2009) Toward unified satellite climatology of aerosol properties: What do fully compatible MODIS and MISR aerosol pixels tell us?, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 110, 402-408.
- Mori, I., M. Nishikawa, H. Quan, and M. Morita (2002) Estimation of the concentration and chemical composition of kosa aerosols at their origin, *Atmospheric Environment*, 36, 4569-4575.
- Mori, I., M. Nishikawa, T. Tanimura, and H. Quan (2003) Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport, *Atmospheric Environment*, 37, 4253-4263.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2004) Studies on Emission and Transport of Asian Dust, Report from Korea Institute of Science and Technology, UCG0639-7485-9.
- NIER (2009) Emission Mechanism of Asian Dust in Source Regions and Its Characteristics by Transport Routes (III), Report from Hankuk University of Foreign Studies.
- Nishikawa, M., Q. Hao, and M. Morita (2000) Preparation and evaluation of certified reference materials for Asian mineral dust, *Global Environ. Res.*, 4, 103-113.
- Ooki, A. and M. Uematsu (2005) Chemical interactions between mineral dust particles and acid gases during Asian dust events, *J. Geophys. Res.*, 110, D03201, doi:10.1029/2004JD004737.
- Pankow, J.F. (1987) Review and comparative analysis of the theories on partitioning between the gas and aerosol particulate phases in the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 21, 2275-2283.
- Park, M.H., Y.P. Kim, and C.-H. Kang (2001) Aerosol composition change due to Yellow Dust: springtime measurement data between 1993 and 1996 at Kosan, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 17, 487-492. (in Korean with English abstract)
- Park, M.H., Y.P. Kim, and C.-H. Kang (2003) Aerosol composition change due to dust storm: measurements between 1992 and 1999 at Gosan, Korea, *Water Air Soil Pollution Focus*, 3, 117-128.
- Shao, Y. and C.H. Dong (2006) A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring, *Global and Planetary Change*, 52, 1-22.
- Song, C.H., C.M. Kim, Y.J. Lee, G.R. Carmichael, B.K. Lee, and D.S. Lee (2007) An evaluation of reaction probabilities of sulfate and nitrate precursors onto East Asian dust particles, *J. Geophys. Res.*, 112, D18206, doi:10.1029/2006JD008092.
- Stout, J.E., A. Warren, and T.E. Gill (2009) Publication trends in aeolian research: An analysis of the Bibliography of Aeolian Research, *Geomorphology*, 105, 6-17.
- Streets, D.G., F. Yan, M. Chin, T. Diehl, N. Mahowald, M. Schultz, M. Wild, Y. Wu, and C. Yu (2009) Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980-2006, *J. Geophys. Res.*, 114, D00D18, doi:10.1029/2008JD011624.
- Sullivan, R.C., S.A. Guazzotti, D.A. Sodeman, and K.A. Prather (2007) Direct observations of the atmospheric processing of Asian mineral dust, *Atmospheric Chem. Phys.*, 7, 1213-1236.
- Sun, J., M. Zhang and T. Liu (2001) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate, *J. Geophys. Res.*, 106, 10,325-10,333.
- Sun, Y., G. Zhuang, Y. Wang, X. Zhao, J. Li, Z. Wang, and Z. An (2005) Chemical composition of dust storms in Beijing and implications for the mixing of mineral aerosol with pollution aerosol on the pathway, *J. Geophys. Res.*, 110, D24209, doi:10.1029/2005JD006054.
- Tamamura, S., T. Sato, Y. Ota, X. Wang, N. Tang, and K. Hayakawa (2007) Long-range transport of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from the eastern Asian continent to Kanazawa, Japan with Asian dust, *Atmospheric Environment*, 41, 2580-2593.
- Tanaka, T.Y. and M. Chiba (2005) Simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 83A, 255-278.
- Tegen, I., M. Werner, S.P. Harrison, and K.E. Kohfeld (2004), Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05105, doi:10.1029/2003

- GL019216.
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2001) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs), <http://www.chem.unep.ch/sc/> (accessed January 2002).
- Wang, X., J. Huang, M. Ji, and K. Higuchi (2008) Variability of East Asia dust events and their long-term trend, *Atmospheric Environment*, 42, 3156-3165.
- Won, S.R., Y. Choi, A.R. Kim, S.H. Choi, and Y.S. Ghim (2010) Ion concentrations of particulate matter in Yongin in spring and fall, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 265-275. (in Korean with English abstract)
- Wu, Z.J., Y.F. Cheng, M. Hu, B. Wehner, N. Sugimoto, and A. Wiedensohler (2009) Dust events in Beijing, China (2004-2006): comparison of ground-based measurements with columnar integrated observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6915-6932.
- Xin, J., Y. Wang, Z. Li, P. Wang, W.M. Hao, B.L. Nordgren, S. Wang, G. Liu, L. Wang, T. Wen, Y. Sun, and B. Hu (2007) Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005, *J. Geophys. Res.*, 112, D05203, doi: 10.1029/2006JD007075.
- Xu, J., M.H. Bergin, R. Greenwald, J.J. Schauer, M.M. Shafer, J.L. Jaffrezo, and G. Aymoz (2004) Aerosol chemical, physical, and radiative characteristics near a desert source region of northwest China during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S03, doi:10.1029/2003JD004239.
- Yamasaki, H., K. Kuwata, and H. Miyamoto (1982) Effects of ambient temperature on aspects of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons, *Environ. Sci. Technol.*, 16, 189-194.
- Yu, X., T. Cheng, J. Chen, and Y. Liu (2006) A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia, *Atmospheric Environment*, 40, 5787-5797.
- Yuan, H., G. Zhuang, J. Li, Z. Wang, and J. Li (2008) Mixing of mineral with pollution aerosols in dust season in Beijing: Revealed by source apportionment study, *Atmospheric Environment*, 42, 2141-2157.
- Zhang, D. and Y. Iwasaka (1999) Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in spring of 1995 and 1996, *Atmospheric Environment*, 33, 3213-3223.
- Zhang, D., J. Zang, G. Shi, Y. Iwasaka, A. Matsuki, and D. Trochkin (2003a) Mixture state of individual Asian dust particles at a coastal site of Qingdao, China, *Atmospheric Environment*, 37, 3895-3901.
- Zhang, D., Y. Iwasaka, G. Shi, J. Zang, A. Matsuki, and D. Trochkin (2003b) Mixture state and size of Asian dust particles collected at southwestern Japan in spring 2000, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 4760, doi:10.1029/2003JD003869.
- Zhang, X.Y., R. Arimoto, and Z.S. An (1997) Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation, *J. Geophys. Res.*, 102, 28,041-28,047.